



I. Einleitung

In gemäßigten Klimazonen werden Zuckerrüben klassischerweise als sommerannuelle Frucht mit Aussaat im Frühjahr (März - April) und Ernte im Herbst (September - Dezember) angebaut. Winterrüben hingegen sind Zuckerrüben, bei denen die Aussaat im Spätsommer bis Herbst erfolgt und die Ernte der vegetativen, nicht geschossten Rübe im darauffolgenden Sommer bzw. Herbst nach Überwinterung der Jungpflanzen im Feld (Eichholz & Röstel, 1962). Grundsätzlich ist ein Anbau von Winterrüben zur Rübensamenvermehrung sowie für die Erzeugung von Zucker oder Bioenergie denkbar. In dieser Arbeit wird die Anbauform, die auf die Erzeugung von Zucker abzielt mit dem Begriff Winterzuckerrüben umschrieben. Der Terminus Winterrübe findet Verwendung, wenn keine spezielle Nutzungsform zu spezifizieren ist.

Aktuell werden Winterzuckerrüben im Mittelmeerraum (Südspanien, Marokko) sowie im Süden Kaliforniens (Imperial Valley) kommerziell angebaut. Der Grund für den Anbau als Winterfrucht in diesen Regionen ist eine milde Winterwitterung, aber sehr hohe Temperaturen während des Sommers, die sich negativ auf die Zuckereinlagerung im Rübenkörper auswirken (Ulrich, 1952).

Schossneigung der Zuckerrübe

Ein erhebliches Problem beim Anbau von Winterzuckerrüben stellt deren Wachstumsbiologie dar. Die Zuckerrübe ist eine 2jährige Pflanze, die im ersten Jahr vegetativ wächst und ein Speicherorgan (Rübenkörper) ausbildet. Nach Vernalisation bei Temperaturen $< 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, geht die Zuckerrübe unter Langtagbedingungen (Photoperiodismus) in die generative Wachstumsphase über und beginnt ihre Sprossachse zu strecken (Schossen) und einen Spross mit Samenträger auszubilden (Milford et al. 2010). Die Zuckerrübenpflanzen werden in dieser Entwicklungsphase als Schosser bezeichnet. Während in Südspanien Schossraten von etwa 20 % als hoch einzustufen sind (Morillo-Velarde, persönliche Mitteilung 2012), ist unter mitteleuropäischen Klimabedingungen mit dem Auftreten von 100 % Schossern nach Winter zu rechnen (Hoffmann & Kluge-Severin 2011). Bei der Gewinnung von Zucker sind Schosser unerwünscht, da sie zu einer erheblichen Verminderung des Rübenenertrages führen (Jaggard et al., 1983) und schlechte Verarbeitungseigenschaften aufgrund hoher Gehalte an Lignin und der Melassebildner Na, K, Amino N sowie geringe Zuckergehalte aufweisen (Hoffmann & Kluge-Severin 2011). Um ein Aussamen der Samenträger auf dem Feld und das massive Auftreten von Unkrautrüben in Folgekulturen zu vermeiden, sind sämtliche Schosser aus dem Bestand zu entfernen. Der Anbau von Winterzuckerrüben in Mitteleuropa setzt daher das Nicht-Schossen der Pflanzen nach Winter voraus.

Erwartete Vorteile der Winterzuckerrübe

Als Gründe für den Anbau von nicht-schossenden Winterrüben in Mitteleuropa gelten eine potentiell signifikante Steigerung des Trockenmasseertrages von Rübe und Blatt um bis zu 26 % (Hoffmann & Kluge-Severin, 2010; Jaggard & Werker, 1999) sowie eine bedeutende Verlängerung der Zuckerrübenkampagne aufgrund sehr früh in der Vegetationsperiode erzielbarer Erntetermine (Kluge-Severin et al., 2009).

Ein wesentlicher, ertragslimitierender Faktor beim Anbau sommerannueller Zuckerrüben ist die späte Aussaat und langsame Jugendentwicklung der Pflanzen, die sehr niedrige Blattflächenindices in den strahlungsintensiven Monaten April und Mai zur Folge hat. Dies führt dazu, dass ein beachtlicher Anteil der eingestrahlten Lichtenergie durch unvollständige Absorption aufgrund zu geringer Blattfläche bis zum Erreichen eines optimalen Blattflächenindices von 3,5 bis 4 (Röver, 1995; Kenter, 2003; Kenter et al., 2006) etwa 2 bis 3 Monate nach Aussaat (Milford et al. 1985) ungenutzt bleibt. Die Biomassebildung von Zuckerrüben ist im Wesentlichen eine Funktion aus dem Produkt der Summen der photosynthetisch aktiven Einstrahlung, des Blattflächenindex ($\text{m}^2 \text{ Blatt m}^{-2} \text{ Bodenoberfläche}$), der Lichtnutzungseffizienz der Pflanze ($\text{g Biomasse MJ}^{-1} \text{ absorbierter Strahlung}$) sowie des Ernteindex (Ernteertrag im Verhältnis zum Gesamtertrag; Hoffmann, 2006). Beim Anbau von Winterrüben ist eine Ertragssteigerung durch Synchronisation von Blattbildung und hoher Einstrahlung im Frühjahr zu erwarten. Bei Aussaat im Herbst ist die Phase der Jugendentwicklung zeitlich vorgezogen. Im August gesäte Zuckerrüben erreichen vor Winter Blattflächenindices von ca. 1,5, jedoch sterben die Blätter aufgrund von Frosteinwirkung sowie ggf. Blattkrankheitsbefall über Winter ab (Kluge-Severin, 2009). Trotzdem erreichen Winterrüben den optimalen Blattflächenindex von 3,5 mit Mitte bis Ende Mai etwa 3 bis 5 Wochen früher als im Frühjahr gesäte Zuckerrüben (Kluge-Severin, 2009; Wood & Scott, 1975) und können somit die im Frühjahr zur Verfügung stehende photosynthetisch aktive Strahlung besser für die Ertragsbildung nutzen als im Frühjahr gesäte Zuckerrüben.

Nutzungsformen

Neben der Gewinnung von Zucker ist die Zuckerrübe hervorragend zur Verwendung als nachwachsender Rohstoff für die Erzeugung von Bioenergie geeignet. Im Zuge einer Vielzahl nationaler und internationaler Maßnahmen zur Einhaltung des Klimaschutzes, hat die Bedeutung regenerativer Energieträger in jüngerer Vergangenheit stark zugenommen (BMU & BMELV, 2009; Europäisches Parlament, 2008). Energiepflanzen sollten ein möglichst hohes Ertragspotential aufweisen (Amon et al., 2007). Die Vorzüglichkeit der Zuckerrübe als Energiepflanze ergibt sich aus folgenden Eigenschaften der Kultur: (i) Zuckerrüben weisen zusammen mit Mais die höchste Flächenproduktivität (Biomasse- und Nettoenergieertrag) aller Nutzpflanzen der gemäßigten Zonen auf (Hoffmann &

Stockfisch, 2010; Schmitz, 2003), und (ii) besitzen hervorragende Eigenschaften für die Erzeugung von Ethanol (Schmitz, 2003) sowie Biogas (Starke & Hoffmann, 2011). Eine ganzjährige Bereitstellung von Zuckerrüben als Substrat für Biogasanlagen ist aufgrund begrenzter Lagerungsfähigkeit der Zuckerrübe durch alleinigen sommerannuellen Anbau nicht ohne weiteres gewährleistet. Mit dem Anbau von Winterrüben könnte eine ganzjährige Bereitstellung des Rohstoffs Zuckerrübe für die Erzeugung von Biogas sichergestellt werden. Die Integration der mit keiner anderen Kulturpflanze verwandten Zuckerrübe in Fruchtfolgen zur Erzeugung von Bioenergie ist aufgrund der vielfältigen positiven Effekte (Unkräuter, Krankheiten, Schädlinge, Biodiversität) vielgestaltiger Fruchtfolgen gegenüber der einseitigen Fixierung auf wenige landwirtschaftliche Kulturen wie z. B. Mais von hoher Bedeutung.

Schossende Winterrübe

Aktuell ist keine nach Winter nicht-schossende Zuckerrübensorte am Markt erhältlich, und in den nächsten Jahren ist mit der Zulassung einer solchen Sorte nicht zu rechnen. Der Anbau basierend auf heutigen, nach der Winterperiode schossenden Zuckerrüben-Genotypen - im Folgenden als schossende Winterrüben bezeichnet - könnte bereits heute einen Beitrag zur Erweiterung von Energiefruchtfolgen leisten und eine ganzjährige Bereitstellung von Zuckerrübenmaterial als Substrat für die Biogasgewinnung sicherstellen. Zu erwarten sind hohe oberirdische Biomasseerträge (Blätter und Schosstriebe) aber nur geringe Rübenenerträge (Hoffmann & Kluge-Severin, 2011), die früh in der Vegetationsperiode geerntet werden können. Das Produktionssystem 'schossende Winterrübe als Rohstoff für die Biogaserzeugung' ist bisher jedoch nicht erforscht.

Winterhärte - Forschungsstand

Die wesentliche Voraussetzung für den Anbau von Winterrüben unter mitteleuropäischen Witterungsbedingungen ist eine hohe Winterhärte der Pflanze, wobei die Frosttoleranz von wesentlicher Bedeutung ist. Schon in den Anfängen der Zuckerrübenzüchtung erkannte Achard (1809) die Möglichkeit, Zuckerrüben unter mitteleuropäischen Klimabedingungen erfolgreich im Feld zu überwintern. Seither hat es verschiedene Untersuchungen zur Entwicklung eines direkten Verfahrens der Zuckerrübensaatzgewinnung nach Aussaat im Spätsommer oder Herbst mit anschließender Überwinterung der Jungpflanzen im Feld sowie zur Entwicklung eines Anbauverfahrens Winterzuckerrübe gegeben. Für eine detailliertere Darstellung der Forschungsaktivitäten zu Winterrüben bis in die späten 1950er Jahre sowie die züchterische Bearbeitung der Winterzuckerrübe sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Eichholz und Röstel (1962) verwiesen. Senff (1958, 1961) unternahm umfangreiche Untersuchungen zur Feldüberwinterung von Zuckerrüben zur Saatgutgewinnung mit besonderem Augenmerk auf Maßnahmen zur Verminderung von Pflanzenverlusten während

des Winters. Dabei stellte sich heraus, dass die Frosttoleranz von Zuckerrüben mit einem Maximaldurchmesser des Rübenkörpers von 5 bis 15 mm am höchsten war, jedoch kleinere und größere Rübenpflanzen stark frostanfällig waren und bis zu 100 % auswinteren. Auch aus der Saatgutvermehrung ist bekannt, dass ein Zusammenhang zwischen Rübengröße und Frosttoleranz besteht. Kockelmann & Meyer (2006) nennen einen Optimalbereich von 1 bis 2 cm maximalen Rübendurchmessers für höchste Frosttoleranz, aber auch Achard (1809) erkannte bereits, dass kleine Rüben besser überwintern als ausgewachsene. Neben dem Einfluss der Einzelpflanzengröße auf die Frosttoleranz beobachtete Senff (1961) einen starken Umwelteinfluss auf die Auswinterungsraten von Winterrüben und berichtete, dass Pflanzen optimaler Größe auch sehr tiefe Lufttemperaturen ohne größere Schäden überstanden, wenn eine Schneedecke oder ein künstlicher Kälteschutz vorhanden waren.

Seit einigen Jahren wird der Anbau von Winterrüben wieder verstärkt diskutiert und untersucht, da ein gesteigertes Interesse an Energiepflanzen als nachwachsende Rohstoffe für die Gewinnung von Bioenergie besteht, und es bedeutende Fortschritte im Verständnis der Blühbiologie von Zuckerrüben gegeben hat, die die Realisierung eines nicht-schossenden Genotyps mittels gentechnischer Verfahren in Zukunft möglich erscheinen lassen (Jung & Müller, 2009; Pin et al., 2012).

Kirchhoff et al. (2012) publizierten kürzlich die Ergebnisse ihrer umfangreichen Untersuchungen der genetischen Variabilität der Winterhärte in einem Panel von 396 *Beta vulgaris* L. Accessionen unter verschiedenen natürlichen Umweltbedingungen Mitteleuropas. Dabei zeigte sich, dass neben dem starken Umwelteinfluss (0-100 % Überlebensrate) eine ebenso hohe genetische Variabilität der Überlebensraten vorhanden war. Während die höchsten Überlebensraten in den Accessionen der Wildrüben (*Beta vulgaris* subsp. *maritima* (L.) Arcang.) und sog. Blattrüben (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* cultivar group leaf beet) gefunden wurden, schnitt die Gattung der Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) im Mittel über alle untersuchten Accessionen mit rund 40 % Überlebensrate am besten ab.

Offene Fragen

Obwohl die Einflussgrößen Umwelt, Genotyp und Phänotyp auf die Frosttoleranz von Zuckerrüben wohl bekannt sind, gibt es bisher keine Informationen über die physiologischen Mechanismen der Frosttoleranz bei Zuckerrüben. Es ist nicht bekannt, ob die größenabhängigen Unterschiede in der Frosttoleranz von Zuckerrüben tatsächlich auf den maximalen Rübendurchmesser oder auf ein bestimmtes physiologisches Entwicklungsstadium der Pflanze zurückzuführen sind. Weiterhin ist nicht dezidiert beschrieben, welche Witterungsverhältnisse zur Auswinterung der Zuckerrübenpflanzen führen, und wie man die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen bestimmten Standort verlässlich abschätzen kann. Bislang fehlen systematische Untersuchungen zum Einfluss des

Anbaumanagements (Saattermin, Bestandesdichte, Sorte) auf den Überwinterungserfolg und die Ertragsbildung nach Winter (schossende Winterrübe) in verschiedenen Umwelten. Mit der Beantwortung u. A. dieser Fragen, beschäftigte sich das im Rahmen einer Förderungsinitiative der Bundesregierung vom BMBF / PTJ geförderte Verbundprojekt 'Bioenergie 2021 - Forschung für die Nutzung von Biomasse', dem die Entstehung der vorliegenden Arbeit zu Grunde liegt.

Struktur und Ziele des Verbundprojektes Bioenergie 2021

Das Verbundprojekt Bioenergie 2021 fokussierte auf einer ganzheitlichen Betrachtung von Winterrüben als Energiepflanze entlang der Wertschöpfungskette. Dabei wurden alle Aspekte des biologischen Systems Winterrübe von der Züchtung als vorgelagerter Bereich über den Anbau im Feld bis zur Verwertung des Rüben- und Sprossmaterials als Rohstoff zur Energieerzeugung in einem eng vernetzten interdisziplinären Ansatz untersucht. Dies umfasste die Erforschung der Genetik des Schossverhaltens, die Erfassung der genetischen Variabilität sowie die physiologische Untersuchung der Winterhärte. Desweiteren erfolgte die Charakterisierung der Ertragsbildung schossender Winterrüben nach Winter, die Konzeption von Produktionssystem und Konversion der Biomasse in Energie sowie die mathematische Modellierung dieser Prozesse, um Vorhersagen über Ertrag und Qualität und eine Einschätzung über die Folgen dieser Technologie für Umwelt und Klimaschutz zu ermöglichen. Das übergeordnete Ziel des Verbunds bestand darin, das biologische System Winterrübe von der Züchtung bis zur Verwertung als Ganzes zu verstehen.

Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Frosttoleranz und der Modellierung des Ausfallrisikos von Winterrüben, sowie der Ermittlung erzielbarer Trockenmasseerträge von schossenden Winterrüben in Abhängigkeit von Umweltaspekten wie den Witterungsbedingungen und dem Anbaumanagement sowie der verwendeten Sorte. Dazu wurden in den Jahren 2009/10, 2010/11 und 2011/12 an den Standorten Göttingen (51° 28'N, 9° 54'E; kontinentales Klima) und Kiel (54° 18'N, 9° 58'E; maritimes Klima) Feldversuchsserien mit den Einflussfaktoren (i) Saattermin und Bestandesdichte, (ii) Sorte, und (iii) Sorte und Bestandesdichte angelegt. Durch die Kombination aus verschiedenen Saatterminen (April, Juni und August) und Bestandesdichten (148, 246 und 370 tausend Pflanzen ha⁻¹) wurde eine hohe Variabilität der Einzelpflanzengrößen erzeugt, die eine systematische Untersuchung des Phänotypeffektes auf den Überwinterungserfolg von Zuckerrüben unter verschiedenen Umweltbedingungen ermöglichte. Versuchsbegleitend wurden in den Saattermin x Bestandesdichte Versuchen über Winter Temperaturen im Bestand der Winterrüben an folgenden Messpositionen in stündlicher Auflösung ermittelt: (i) über dem Bestand, (ii) an der Bodenoberfläche, (iii) in 5 cm Bodentiefe und (iv)